

Présentation du réacteur et principales options

Par J. CHATOUX *

I. — BUT

Le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin, implanté à Grenoble, est essentiellement une source de neutrons à l'usage des physiciens travaillant sur la matière condensée et des physiciens nucléaires.

Le neutron est un bon outil d'investigation de la matière condensée. Par ce terme, on désigne toute substance dans laquelle les atomes sont liés par des forces et constituent un assemblage dont les propriétés macroscopiques sont déterminées par cet assemblage et par les forces qui relient les atomes : les corps solides, les liquides et la substance biologique constituent de la matière condensée. Le neutron est surtout un précieux complément aux autres moyens d'études connus (rayon X, rayons lumineux, électrons etc...) mais il trouve de plus en plus un champ d'application propre à cause de propriétés spécifiques :

— Grâce à son absence de charge électrique, ou plus exactement grâce à sa très faible charge électrique, il n'a pas à vaincre de répulsion coulombienne importante. Il possède donc une grande pénétrabilité dans la matière et permet l'étude d'arrangements profonds. Le neutron thermique peut en effet s'approcher des noyaux sans posséder une vitesse ni une énergie notable ; restant "longtemps" au voisinage des noyaux, il a une forte probabilité d'interagir avec eux. Animés de vitesses un

peu plus élevées les neutrons de résonance permettent de connaître les niveaux d'énergie des noyaux avec lesquels ils réagissent.

Ces propriétés de grande pénétrabilité trouvent entre autres des applications intéressantes pour l'étude des noyaux très lourds ou pour les hautes pressions et marquent un avantage certain sur d'autres particules chargées comme, par exemple, les électrons.

— Alors que les rayons X permettent surtout la détermination de la distribution du cortège électronique des différents atomes constituant un solide, les neutrons, eux déterminent directement la position des noyaux. Ainsi deux atomes de numéro atomique voisin, c'est-à-dire possédant un nombre d'électrons presque identique, sont difficilement discernables par les rayons X ; de même, un atome d'hydrogène, qui ne possède qu'un électron, est pratiquement invisible aux rayons X. Par contre, le neutron, qui a des sections efficaces de diffusion semblables pour tous les noyaux, n'aura aucun mal à les identifier. Il permettra par exemple l'étude d'alliages d'aluminium-magnésium pour distinguer la nature et la dimension des précipités en fonction du traitement thermique. En chimie organique, la possibilité de "voir" les atomes d'hydrogène et de les différencier des atomes d'azote et d'oxygène est importante. Des applications intéressantes basées sur ces propriétés sont possibles dans l'étude des vitamines, des acides nucléiques, des grosses molécules comme les protéines, etc...

* Chef du Projet de Réacteur à Haut Flux

— Il a un moment magnétique, ce qui le rend sans égal pour l'étude des structures magnétiques, en particulier pour déterminer les arrangements dont dépendent leurs propriétés (densité et carte d'aimantation - force de liaison, etc... Il est par exemple actuellement possible de faire des cartes d'aimantation à l'échelle du centième d'angström).

— Il est possible de l'obtenir à diverses énergies, en particulier à des énergies faibles, comparables aux énergies d'excitation des atomes de la matière condensée, et à des longueurs d'ondes égales ou supérieures aux distances interatomiques (énergie $\approx 2\ 000$ fois plus faible que celle des électrons et 10^5 à 10^7 fois plus faible que celle d'un rayonnement électro-magnétique à longueur d'onde égale) (Figure 1).

— Les neutrons de faible énergie sont obtenus par ralentissement des neutrons de fission par chocs successifs sur les noyaux d'un modérateur approprié (eau lourde par exemple). Il est possible d'obtenir divers niveaux d'énergies en fonction de la température du modérateur ou de la nature du ralentissement. Les énergies faibles permettent de mesurer avec une précision suffisante les énergies de liaison des atomes, ce qui n'est pas toujours le cas avec des rayonnements électromagnétiques, en règle générale beaucoup plus énergiques.

— Comme toute particule, le neutron a une longueur d'onde associée λ qui est inversement proportionnelle à sa vitesse :

$$\lambda = h/mV$$

$$\text{avec } V = 1,38.10^6 E^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda = 0,286 E^{-\frac{1}{2}}$$

Si nous considérons l'énergie d'agitation thermique à la température ambiante T et si K est la constante de Boltzman, $E = KT = 1/40$ eV. Un neutron thermique ayant cette énergie aura une vitesse de 2 200 m/s à laquelle sera associée une longueur d'onde $\lambda = 1,81 \text{ \AA}$. Cette longueur d'onde peut être portée à une quinzaine d'angströms, si l'on met les neutrons en équilibre dans un modérateur refroidi à très basse température. Inversement, un modérateur très chaud permettrait d'avoir des longueurs d'ondes inférieures à 0,5 angström.

Les grandes longueurs d'ondes supérieures aux distances interatomiques (qui sont de l'ordre de 1 à 10 angströms) permettent d'observer des défauts étendus, tels que ceux créés par des irradiations dans les solides.

*
* *
*

En physique des états condensés, les possibilités d'utilisation des neutrons permettent de réaliser plusieurs grandes classes d'expériences, parmi lesquelles nous citerons :

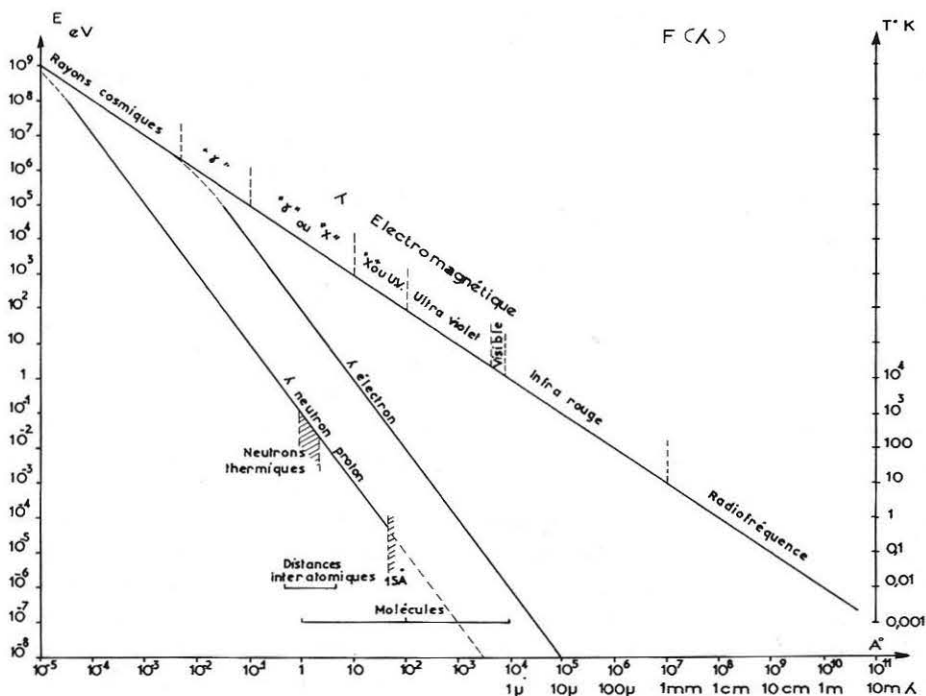


Fig. 1 — Energie de divers rayonnements en fonction de la longueur d'onde.

La diffraction des neutrons :

La diffraction des neutrons est un processus élastique permettant l'étude statique des structures de réseaux.

On utilise en général un faisceau monochromatique de neutrons diffractés par une poudre (cercles de Debye - Scherrer) ou un faisceau polycinétique diffracté par un cristal (point sur le diagramme de Lauë).

On peut ensuite déterminer la répartition spatiale des centres diffuseurs : noyaux pour les structures des cristaux, électrons responsables du moment magnétique de l'atome pour les structures magnétiques.

La diffusion aux petits angles :

La diffusion, ou transmission à très petit angle, mesure des corrélations jusqu'à plusieurs milliers d'angströms.

La diffusion inélastique des neutrons pour l'étude dynamique des réseaux

Dans un solide, par exemple, les atomes se déplacent autour de leur position d'équilibre. Ce mouvement d'agitation thermique dans un solide ordonné détermine des spectres d'énergie quantifiée appelés "phonons". Ces quanta ont un ordre de grandeur comparable à l'énergie des neutrons thermiques (0,01 à 0,1 eV). Dès lors, la disparition ou la perte d'énergie d'un de ces phonons se répercute de façon mesurable sur la vitesse et l'énergie du neutron diffusé, alors que cet effet sur un rayon X de 10 keV n'est pratiquement pas mesurable.

Alors que les rayons X ne permettent d'obtenir qu'une "image moyenne" de la structure observée, les neutrons peuvent étudier les mouvements des atomes autour de cette structure. Il en est de même pour l'étude des spins magnétiques des atomes, autour de leur position d'équilibre (magnons).

Les phonons jouent un rôle important dans de nombreuses propriétés des solides (conductibilité thermique, chaleur spécifique, supraconductivité, etc...). Il est donc important de pouvoir les étudier.

Il est par exemple possible d'aborder l'étude de solides complexes, tels que les polymères constitués de longues chaînes plus ou moins régulièrement disposées et de connaître les forces qui existent à l'intérieur des chaînes, mais aussi les forces reliant les chaînes entre elles. On peut aussi obtenir des renseignements sur les mouvements locaux permettant d'avoir des renseignements sur les singularités locales pouvant exister en certains points de la chaîne.

Des applications au phénomène de catalyse, à l'étude des cristaux moléculaires, à l'étude des fluctuations critiques, à la théorie des liquides, etc...montrent la richesse des possibilités de la diffusion inélastique des neutrons.

— En physique nucléaire, les interactions avec la matière ou avec la matière nucléaire offrent encore un vaste champ d'investigations, duquel nous pouvons extraire l'étude : du neutron proprement dit, de son moment dipolaire, l'étude de la fission, et toutes les études mettant en oeuvre des échantillons placés dans un faisceau neutronique.

Ce bref exposé montre cependant l'importance et le champ d'action possible des expériences utilisant les neutrons. Par rapport aux autres sources de rayonnement, ce champ d'action était jusqu'à présent limité par la faiblesse des sources de neutrons disponibles. Mais, depuis quelques années, les progrès réalisés dans la connaissance de la physique, de la thermique et d'une façon générale de la technique des réacteurs ont permis aux ingénieurs de proposer aux physiciens des piles poussées à la limite des possibilités technologiques du moment et qui sont capables de délivrer les flux recherchés.

Outre les avantages sur le pouvoir de résolution des appareils et la qualité des renseignements obtenus, les hauts flux de neutrons permettent de diminuer la taille des monocristaux à préparer donc, en fait, permettent d'accroître le champ des investigations, puisque peu de matériaux sont susceptibles de former de gros monocristaux. Pour les spectres obtenus à partir de poudres, les hauts flux permettent d'avoir un nombre de raies séparées plus grand, donc d'accroître le nombre et la qualité des informations.

De même, la plus grande quantité de neutrons disponible s'accompagne de la possibilité de diminuer la taille des échantillons et ouvre des possibilités nouvelles en chimie, biochimie, et biologie (acides nucléiques, protéines, structures organiques, etc...).

En physique nucléaire, les hauts flux permettent d'améliorer la précision et la finesse des mesures déjà pratiquées.

II. - OPTIONS RETENUES

Pour tirer parti des propriétés et satisfaire les besoins tels qu'ils découlent du précédent paragraphe, le réacteur projeté devait :

- 1) Produire un flux de neutrons thermiques non perturbé d'environ $1,5 \cdot 10^{15}$ n/cm²/s dans un réflecteur

d'eau lourde. Dans ce réflecteur, le maximum de flux devait être situé suffisamment loin du coeur pour permettre des échauffements faibles sur les structures et un volume expérimental important, laissant la place pour disposer le plus grand nombre possible de canaux expérimentaux (Figure 2).

d'ondes envisagées (Figure 3). L'utilisation de cette catégorie de neutrons sera essentiellement réservée à l'étude des liaisons atomiques à faible énergie ou à grande distance interatomique.

c) Un spectre de neutrons chauds, de longueur d'onde

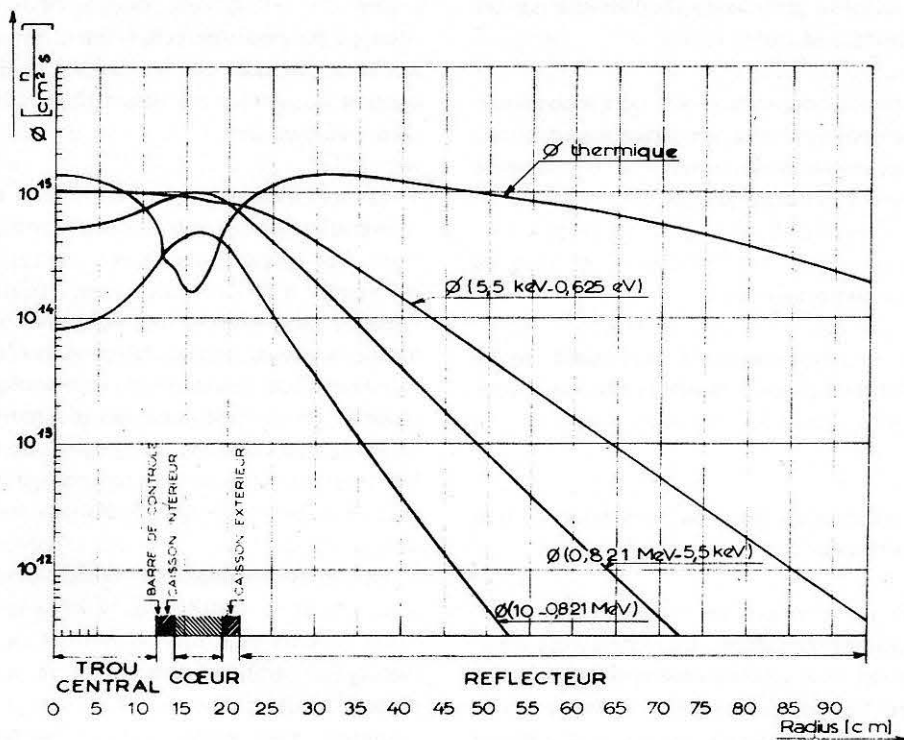


Fig. 2. — Courbes de flux dans le plan médian du coeur

2) Permettre d'obtenir des neutrons dans une gamme de longueurs d'onde comprises approximativement entre 0,5 et 20 angströms, avec des énergies variant de 500 à 0,2 meV.

3) Permettre d'optimiser ces flux selon trois spectres principaux :

a) Un spectre de neutrons thermiques en équilibre avec le milieu, à la température ordinaire de l'eau lourde du réflecteur. Ce spectre possède une répartition maxwellienne des vitesses correspondant à cette température.

b) Un spectre de neutrons froids de grandes longueurs d'ondes $\lambda > 4 \text{ \AA}$ et d'énergie $E < 5 \text{ meV}$ obtenu à l'aide d'une source froide de deutérium liquide à -250° C ., de dimension suffisante (26 dm^3) pour que les neutrons puissent se mettre en équilibre thermique avec le deutérium. Cette source froide, placée dans le réflecteur d'eau lourde, permet de gagner, par décalage du spectre par rapport au spectre thermique dans l'eau lourde, un facteur de 10 à 50 sur les flux correspondants aux longueurs

comprise entre 1 et 0,3 angström et d'énergie E comprise entre 100 et 400 meV, obtenus par passage dans un cylindre de graphite de 20 cm de diamètre, porté à environ 2000° C par chauffage nucléaire. Pour les longueurs d'ondes et les énergies considérées, le gain apporté sur le flux est de l'ordre d'un facteur 15.

Ces neutrons seront utilisés pour l'étude des fortes liaisons atomiques, donc des courtes distances interatomiques.

4) Obtenir un flux de neutrons rapides, source de bruit de fond, aussi réduit que possible dans le réacteur même, et pratiquement totalement supprimé pour certaines expériences placées sur des "conduits de neutrons". Ces conduits sortent du réacteur et se prolongent dans un bâtiment placé dans d'exceptionnelles conditions d'absence de tout rayonnement autre que celui des neutrons thermiques. Ils doivent permettre de réaliser une série d'expériences inédites, en particulier dans le domaine de la biologie moléculaire. (Ces conduits utilisent les propriétés de réflexion totale des neutrons de grande longueur d'onde et permettent,

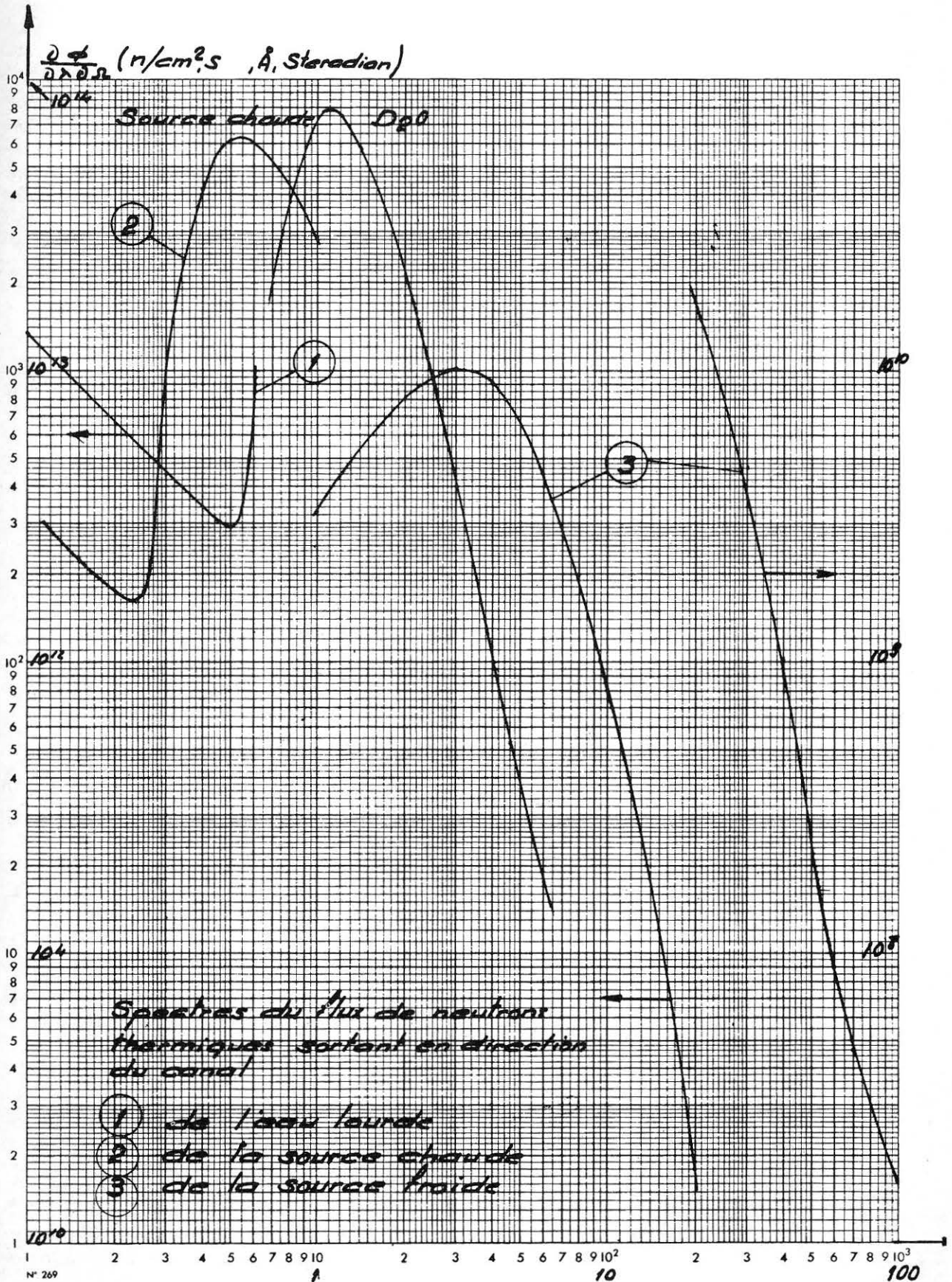


Fig. 3.

grâce à des conduits légèrement courbés, de séparer les neutrons thermiques des neutrons rapides et des γ).

- 5) Comporter un nombre aussi élevé que possible de canaux permettant le maximum d'expériences simultanées (40 sur le R. H. F.) pour rentabiliser un investissement forcément élevé, compte tenu des performances recherchées.
- 6) Présenter une très grande souplesse, autorisant aux moindres frais une refonte partielle ou totale, tous les quatre ans par exemple, d'une partie de l'environnement expérimental, la solution envisagée pour acquiescer cette souplesse devant toutefois permettre une exploitation aussi économique et aisée que possible.
- 7) Avoir le meilleur "rendement" possible, (rapport du flux utile à la puissance thermique totale), pour réduire l'importance du coût du cycle de combustible.
- 8) Obtenir des conditions de sûreté et de fiabilité appropriées, compte tenu des impératifs ci-dessus et de l'environnement.

III. - CONCEPTION ET PERFORMANCES DU REACTEUR A HAUT FLUX

L'analyse quantitative et qualitative des besoins expérimentaux, ainsi que les études préliminaires du coeur, permirent de conclure que les buts recherchés pouvaient être atteints avec un réacteur de faible puissance, 57 MW, refroidi et modéré par de l'eau lourde, en utilisant la technologie des coeurs hautement enrichis en U_{235} , gainés d'aluminium.

Le coeur est une source de neutrons alimentant un réflecteur extérieur, où les neutrons rapides qu'il émet sont ralentis, créant un flux de neutrons thermiques. La détermination du coeur consistait à rendre ce flux maximal, pour la moindre puissance et le cycle de combustible le plus économique. Or le flux de neutrons thermiques dans le réflecteur est principalement lié à la puissance spécifique sur la surface extérieure du coeur supposé homogène ; pour le niveau de flux recherché, la puissance spécifique atteint 3 MW/dm^3 ; cette valeur étant déjà élevée pour une technologie "aluminium", nous avons retenu un coeur cylindrique et homogène, exempt de singularités locales susceptible de provoquer des relèvements de flux, donc des points chauds. De plus,

la substitution d'eau lourde au combustible central, augmentant la probabilité de fuites et la réactivité, permet de diminuer la puissance totale. Enfin le taux de combustion moyen de 30 %, qui minimise le coût du cycle de combustible, détermine la réactivité initiale.

Compte tenu alors d'astreintes mécaniques et thermo-hydrauliques, l'optimisation recherchée conduit à un coeur annulaire de 40 cm de diamètre extérieur, d'une hauteur de 80 cm et possédant un trou central rempli d'eau lourde de 26 cm de diamètre. Sa puissance totale est 57 MW [2]. Le tableau II de l'article suivant rassemble les principales caractéristiques du coeur du réacteur. Son "fonctionnement" neutronique est explicité également dans l'article suivant.

En résumé, il est possible de dire que les neutrons de fission, après ralentissement dans le réflecteur, produisent un maximum de flux à 15 cm du coeur. C'est donc dans cette région "éloignée" du coeur que seront placés les nez de canaux. Au nez des canaux le flux de neutrons rapides est 40 fois moins important que dans le combustible et le gain sur les échauffements, par rapport au combustible, représente un facteur 7 à 8. De plus, les canaux sont orientés tangentiellement au coeur. Cette disposition procure une atténuation d'un facteur 10 environ sur la contribution des γ et des neutrons rapides dans les faisceaux sortants, car elle tire parti de la répartition isotrope des neutrons thermiques dans tout le réflecteur, alors que les neutrons de fission et le rayonnement γ ont une distribution radiale par rapport à la surface externe du combustible.

Les neutrons ralentis dans la zone centrale de l'élément combustible provoquent 25 % des fissions. C'est donc un endroit favorable pour contrôler le réacteur à l'aide d'une barre de pilotage, sans provoquer de perturbations notables sur le flux dans le réflecteur. De même, des barres de sécurité placées immédiatement autour du coeur dans le réflecteur auront, de par leur position, une grande efficacité. Les vitesses d'introduction des barres de pilotage et de sécurité ont été calculées pour éviter, lors de rampes accidentelles de réactivité tout phénomène thermique susceptible de conduire à une redistribution de débit et pour pallier les effets de tous sauts accidentels de réactivité, tels qu'ils pourraient être imaginés dans l'état actuel de nos connaissances.

La conception technique du coeur découle de ces considérations. Partant du centre du réacteur (figure 7, chap. 4), nous distinguons trois régions coaxiales. La région centrale de 26 cm de diamètre est utilisée pour contrôler le réacteur à l'aide d'une barre cylindrique en nickel commandée par le dessous du bloc-pile. La région combustible constituée d'un élément unique entoure la région précédente. Cet élément (du type H. F. I. R. de Oak Ridge) contient 280 plaques courbes soudées sur deux viroles concentriques. Plusieurs raisons ont conduit à adopter cette solution : bonne homogénéité de la répar-

tition du combustible, suppression d'un caisson fixe contenant l'élément, bonne stabilité mécanique, absence de contraintes locales, facilité de manutention. La zone active de 5,5 cm d'épaisseur contient 8,6 kg d'uranium 235, réparti uniformément. Les plaques combustibles ont 1,27 mm d'épaisseur et sont séparées par une lame d'eau de 1,8 mm (Figure 4) ; elles se terminent à chaque extrémité par une zone de 3 cm de hauteur contenant au total 5,8 g de bore 10. La hauteur de l'élément combustible avec ses embouts est de 1,5 m. La région extérieure de 2,5 m de diamètre et de 2,5 m de hauteur constitue le réflecteur d'eau lourde dans lequel aboutissent les nez de canaux.

Les études d'arrangement des canaux et des sources dans le réflecteur autour du coeur, ainsi que le mode de déchargement de l'élément combustible ont déterminé la conception du caisson et des canaux. L'intégration des sources froide et chaude s'est répercutée fortement sur la conception et le dimensionnement du bloc-pile, étant donné la taille et les astreintes propres au fonctionnement et au démontage de ces importants dispositifs. (Figure 5).

Pour la source froide, les comparaisons avec une source à hydrogène, les études de thermalisation et d'échauffement, ont conduit à choisir le deutérium

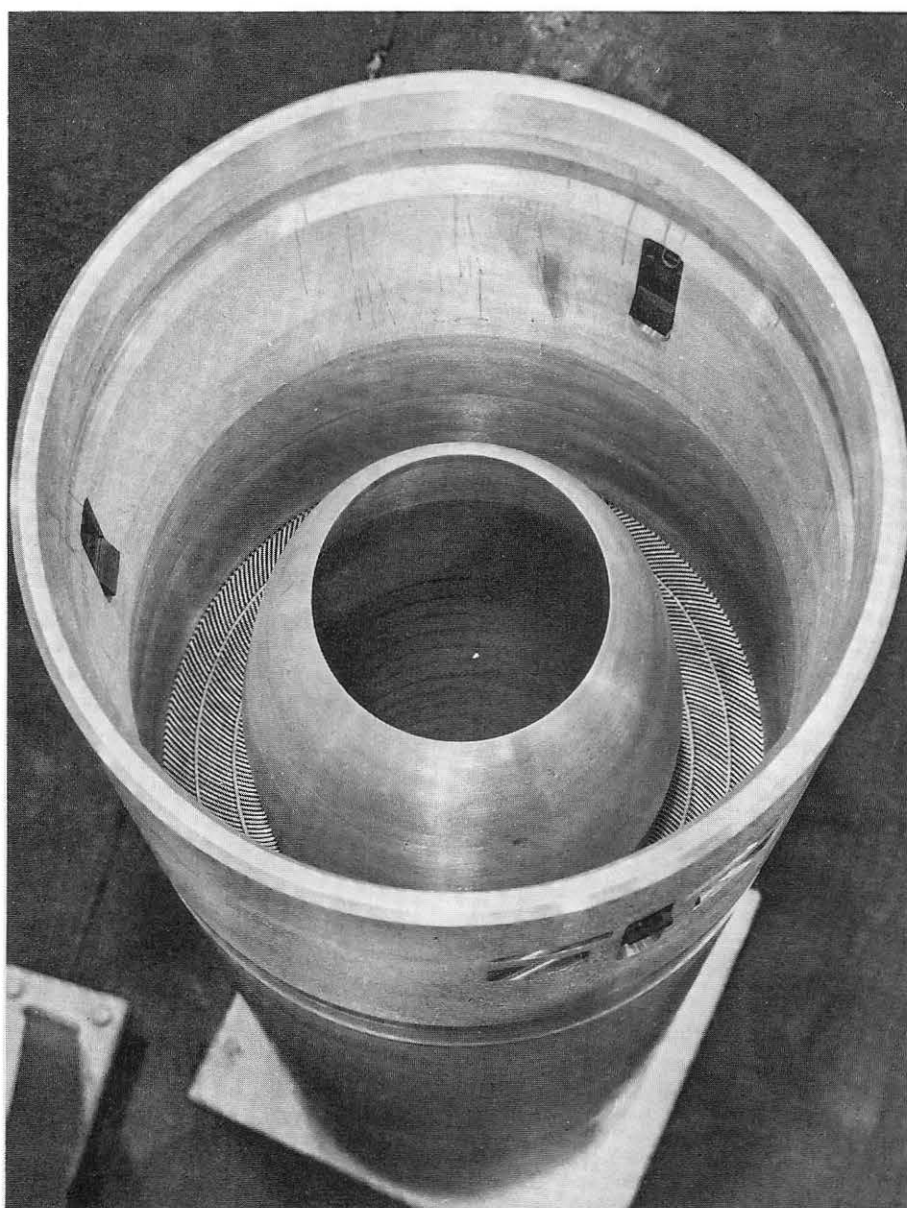


Fig. 4. — L'élément combustible

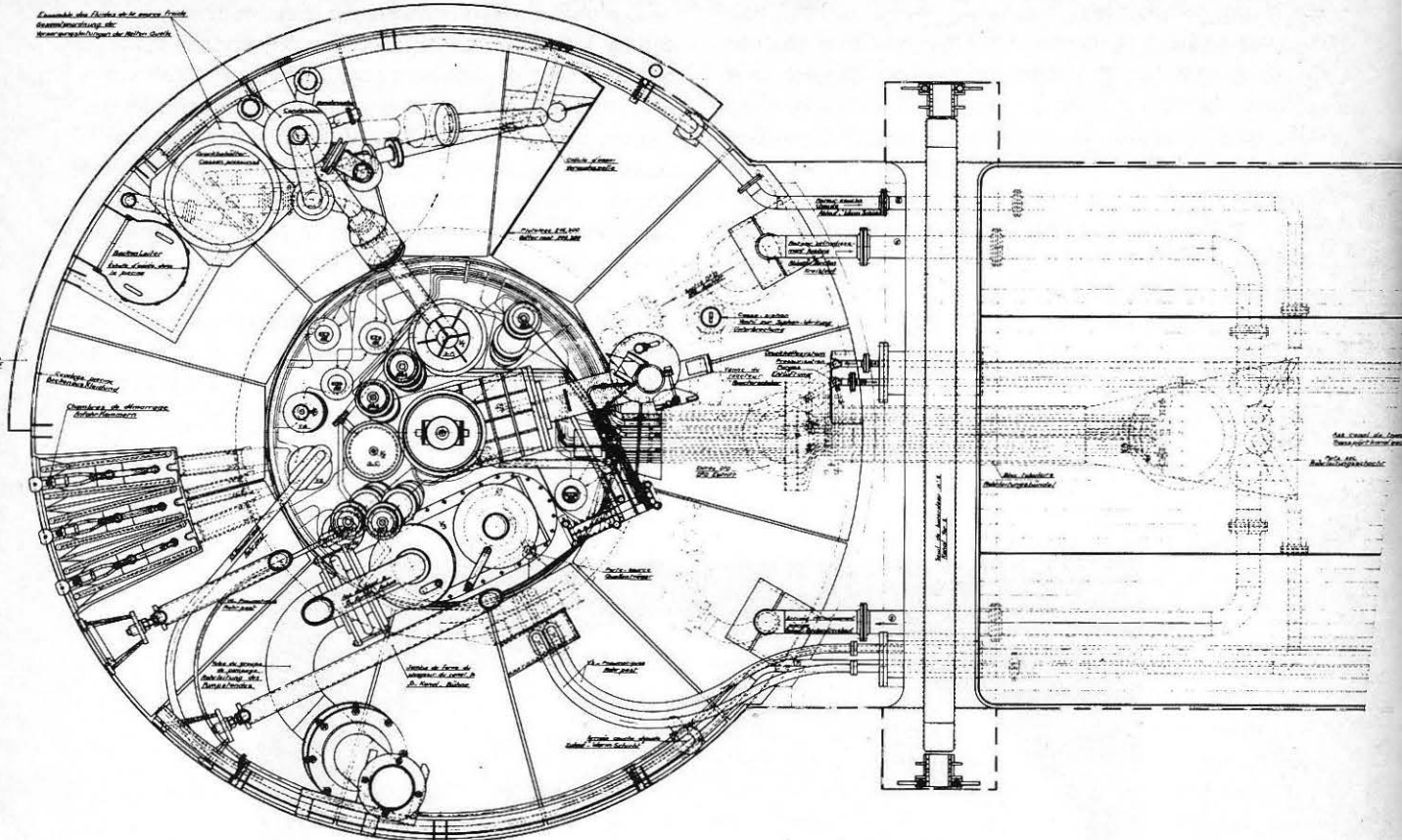


Fig. 5. — Aménagements de la piscine, Vue de dessus, en coupe, au niveau 223,70.

liquide pour les raisons suivantes :

- Une source de deutérium liquide de 38 cm de diamètre installée à 50 cm de l'interface du coeur fournit pour tous les neutrons de longueur d'onde supérieure à 4 angströms un flux supérieur à celui d'une source d'hydrogène placée à 20 cm du coeur.
- Pour une source de deutérium placée loin du coeur, la densité d'échauffement du modérateur et le flux de chaleur transféré de la paroi du vase cryogénique au liquide est comparable à celle des sources déjà existantes, mais serait 10 fois supérieure pour une source à hydrogène.
- La grande surface utile demandée par les utilisateurs (20 cm x 20 cm) ne permettait pas de bénéficier de la compacité d'une source à hydrogène liquide. Un volume liquide seulement 10 fois plus faible au lieu de 100 fois comme théoriquement possible avec l'hydrogène n'était plus décisif ni au plan de la sûreté ni à celui de l'économie.

Les optimisations retenues ont conduit à choisir une cellule sphérique remplie de 26 dm³ de deutérium liquide (Figure 6). Placée à 70 cm de l'axe du coeur,

elle dégage une puissance relativement élevée de 8 kW. Le deutérium est en ébullition à 25⁰ K ; il se condense sur un échangeur refroidi à l'hélium gazeux situé 7 m plus haut dans la piscine. La circulation du deutérium s'effectue par thermosiphon entre cellule et condenseur. L'ensemble de cette installation a demandé de grands soins pour obtenir un fonctionnement sûr. Une double paroi entourant entièrement le circuit de deutérium permet de détecter des fuites éventuelles. Le couplage de fonctionnement du réacteur et de la source exige un système de régulation et de sûreté très complet et fiable. (Figure 7).

La source chaude, étudiée au Kernforschungszentrum de KARLSRUHE, est constituée d'un cylindre de graphite de 20 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur. Le graphite est maintenu à 2 000⁰ K par chauffage nucléaire, grâce à une isolation de laine de graphite de quelques centimètres d'épaisseur [4]. Une enceinte en zircaloy à double paroi est nécessaire pour surveiller l'intégrité de la cellule (Figure 8).

Le réflecteur d'eau lourde est contenu dans un caisson en aluminium de 3 cm d'épaisseur, percé de nombreuses pénétrations de canaux. Dans ce réflecteur, cinq barres de sécurité cylindriques d'environ 10 cm de diamètre, en

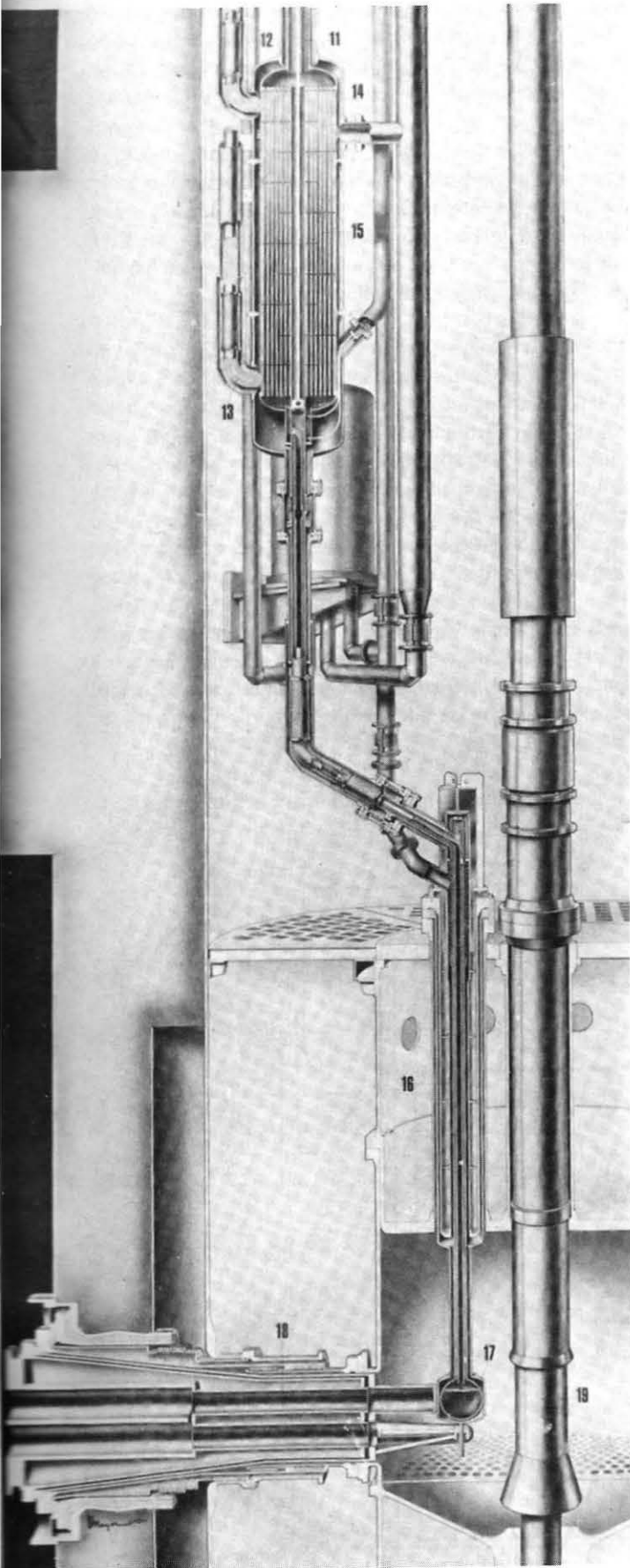


Fig. 6. - Partie de la source froide située dans la piscine.

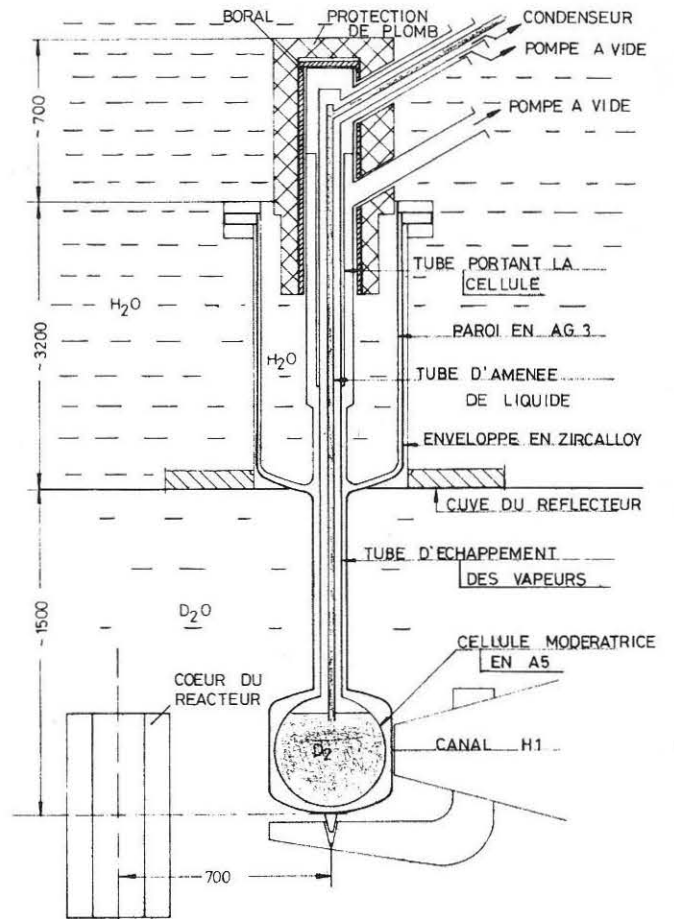


Fig. 7. - Partie de la source froide située dans le réflecteur

LEGENDES
(Fig. 6.)

- 11 - canalisation de deutérium
- 12 - sortie d'hélium froid
- 13 - entrée d'hélium froid
- 14 - canalisation de pompage
- 15 - condenseur
- 16 - partie située dans le réflecteur
- 17 - cellule de deutérium liquide
- 18 - canal d'extraction des neutrons
- 19 - cœur du réacteur

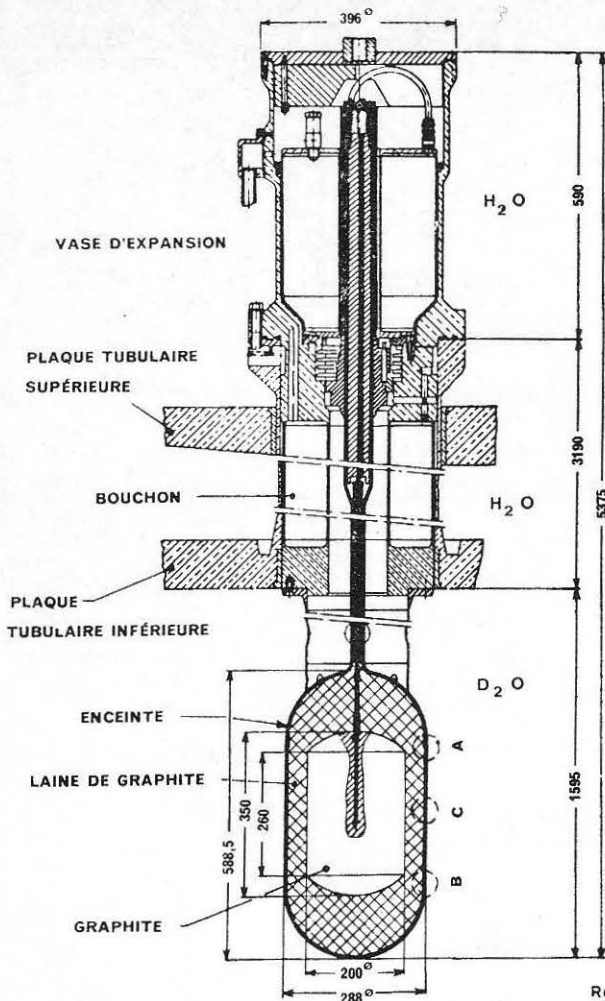


Fig. 8. — Coupe verticale de la source chaude

alliage argent-indium-cadmium, plongent au plus près de l'élément combustible sans être guidées à l'intérieur du réflecteur même. Dans toute la zone déjà décrite entourant immédiatement le cœur, il n'existe donc aucune structure fixe passive. Seules, deux tubulures plongent dans le caisson, en partie basse, pour servir d'appui à l'élément combustible, en partie haute, pour le centrer. La tubulure inférieure se prolonge hors du caisson et sert de guide à la barre de contrôle centrale. La tubulure supérieure se prolonge au dessus pour servir de "cheminée" de manutention de l'élément.

Cette cheminée reçoit latéralement un débit de 2 200 m³/h d'eau lourde sous une pression de 14 bars. L'eau lourde traverse l'élément combustible à une vitesse de 15,5 m/s entre plaques et remonte ensuite à très basse vitesse dans le réflecteur sous une pression de 4 bars. C'est par une optimisation soignée du cœur que ce circuit unique présentant de nombreux avantages a pu être obtenu en laissant le réflecteur à basse pression. Les viroles constituant les supports des plaques canalisent l'eau, au niveau de l'élément combustible. Ces parois sous contraintes, soumises à des flux importants sont ainsi renouvelées à chaque cycle. Par ailleurs, une petite fraction du débit circule dans la région centrale du cœur, refroidit la barre de pilotage et est reprise par un circuit séparé. (Figure 9).

Deux ensembles mécaniques importants prolongent le

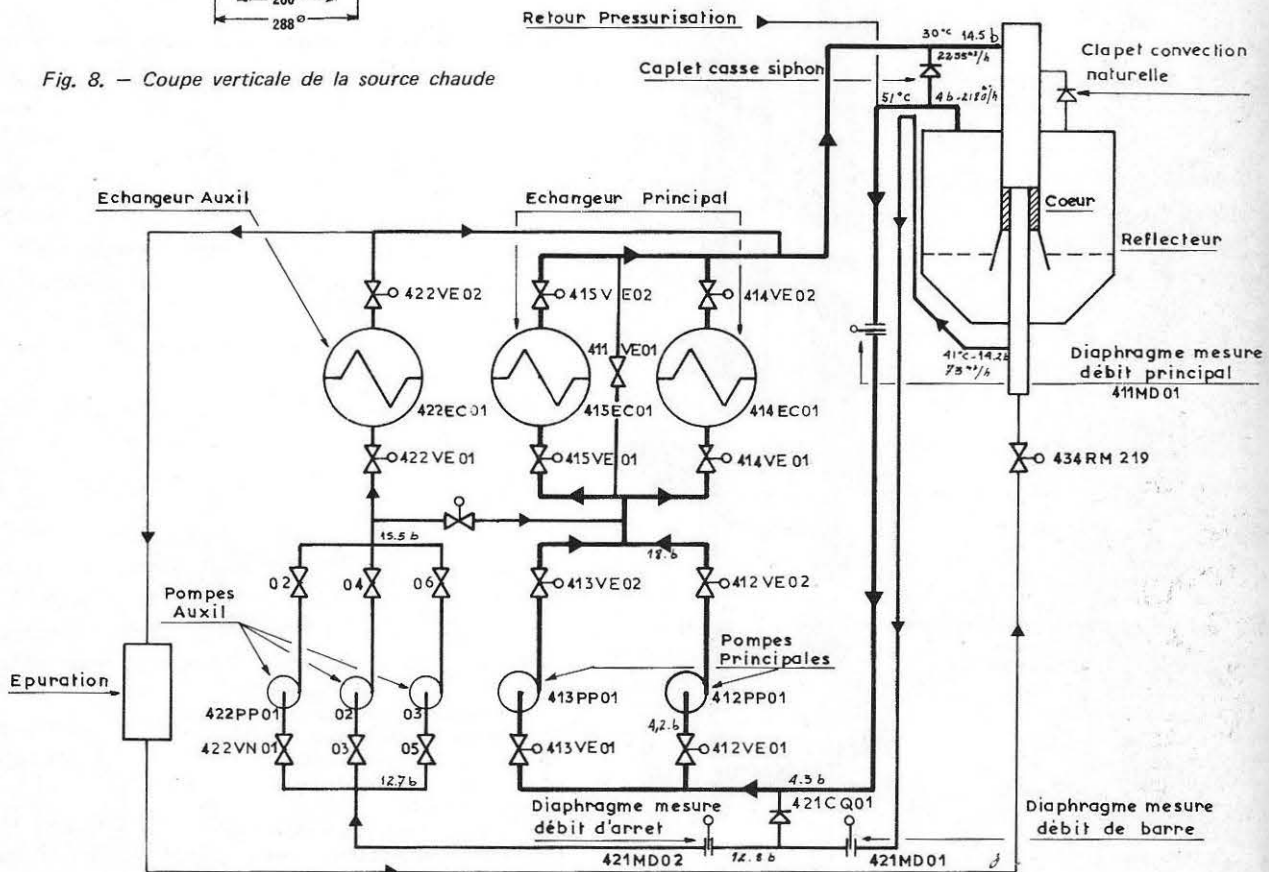


Fig. 9. — Schéma simplifié des circuits primaires d'eau lourde

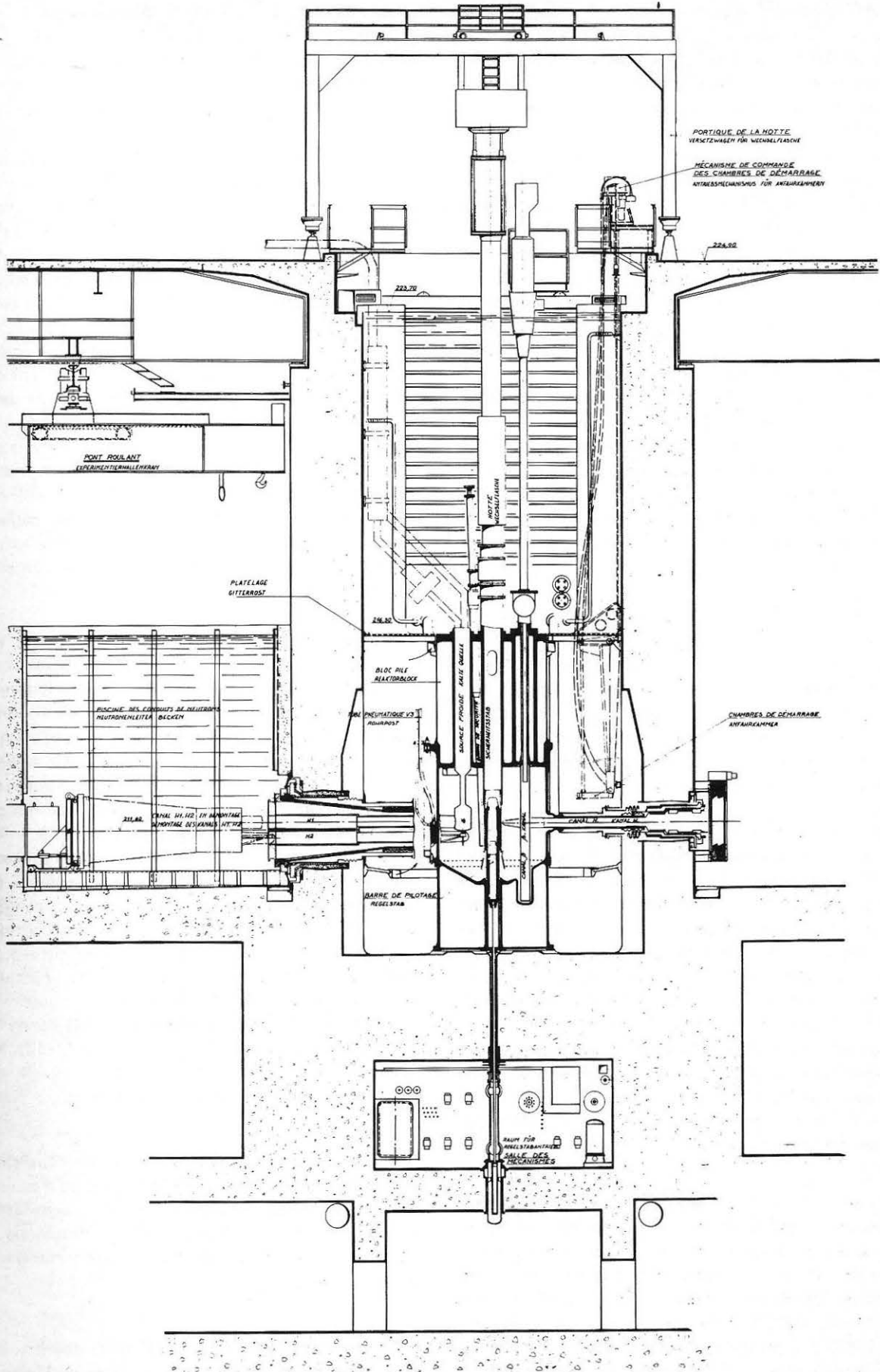


Fig. 10. - Coupe verticale dans le bloc pile

caisson (Figure 10). Le premier est constitué par 16 manchettes en aluminium qui débouchent à l'extérieur de la protection de béton. Elles ont un diamètre de 13 cm à 90 cm au niveau du caisson auquel elles sont raccordées par joint et s'évasent progressivement à l'intérieur de la protection en béton pour atteindre une bride extérieure de 40 cm à 150 cm de diamètre à laquelle est fixé le canal en doigt de gant. Les manchettes contiennent donc de l'eau lourde jusqu'à leur bride extérieure. Quatre manchettes sont inclinées vers le haut, les autres sont horizontales, non radiales et à diverses cotes au voisinage du plan médian du coeur. Le deuxième ensemble mécanique est un bloc tubulaire en aluminium de 2,5 m de diamètre et 3 m de hauteur, servant de couvercle au caisson auquel il est raccordé par un joint. Ce bloc tubulaire est essentiellement constitué de deux plaques épaisses supportant des tubulures verticales ou obliques : la cheminée, les tubulures des barres de sécurité, les tubulures des sources froide et chaude, celles des clapets de convection naturelle, la tubulure de sortie d'eau, une tubulure pour canal vertical et quelques autres pour pneumatiques. Ces diverses tubulures contiennent de l'eau lourde jusqu'à une bride supérieure où sont raccordés les dispositifs mentionnés.

On distingue deux grands types de joints. Les joints sur le caisson sont dans une zone active, quoique faiblement irradiée : ils sont métalliques et démontables à distance, seulement pour une refonte importante. Les joints sur le sommet du bloc tubulaire et à l'extrémité extérieure des manchettes sont très faiblement activés ; ils sont organiques et aisément accessibles pour des démontages opérationnels.

L'ensemble de ce bloc réacteur repose sur le fond d'une piscine d'eau déminéralisée de 6 m de diamètre et de 14,5 m de hauteur. Cette piscine assure la protection supérieure et une partie de la protection latérale en fonctionnement normal et lors du déchargement ou de démontages. Le niveau peut être abaissé à l'arrêt de 7,5 m, rendant accessibles les brides supérieures du bloc tubulaire pour le démontage des dispositifs verticaux. Ces opérations nécessitent la vidange de l'eau lourde et le remplissage en eau ordinaire, opérations séparées par un séchage poussé du bloc réacteur, par une succession de mises sous vide et de balayages d'azote. Le niveau d'eau est ensuite remonté et les manutentions se font alors sous eau, comme dans une pile piscine.

Le déchargement de l'élément combustible, délicat comme dans toutes les piles à eau lourde, est rendu complexe par l'importance de la puissance résiduelle (élément combustible unique constituant le coeur complet et problèmes de criticité). Il est effectué après un jour d'arrêt, alors que les produits de fission dégagent encore 180 kW, puissance évacuable dans l'eau par convection naturelle. Cette opération est réalisée sous la protection de la piscine, par une hotte immergée qui vient reposer sur le sommet de la cheminée. Deux vannes

identiques de part et d'autre de l'accouplement, l'une sur la hotte, l'autre sur la cheminée, ont des diamètres suffisants pour laisser passer l'élément combustible. (Figure 11). L'opération se déroule de la façon suivante : l'accouplement réalise l'étanchéité, grâce à deux joints toriques et un joint gonflable ; l'espace entre les deux vannes est vidangé, séché les deux vannes sont ouvertes et le niveau d'eau lourde monté dans la hotte ; le grappin descend accrocher l'élément combustible et le remonte dans la hotte, les deux vannes sont refermées, l'espace entre les vannes vidangé et séché, la hotte est désaccouplée et transportée sous eau dans la piscine de stockage. L'élément combustible est refroidi en convection naturelle à l'aide d'un échangeur intégré à la hotte qui cède sa chaleur à la piscine elle-même. Au bout de 40 jours, la puissance résiduelle a suffisamment décré (20 kW) pour que la hotte puisse être vidée de son eau lourde et l'élément sorti dans l'eau de la piscine. Il faut remarquer que les grappins des hottes sont munis d'une épée absorbante, qui dans toutes ces opérations, viennent se placer au centre de l'élément combustible, afin d'augmenter le facteur de sous-criticité et pour pallier les effets d'une rentrée accidentelle d'eau légère entre les plaques et autour de l'élément, alors que le trou central peut encore contenir de l'eau lourde.

Au cours des manoeuvres de déchargement et de démontage et par suite du grand nombre de joints entre eau lourde et eau ordinaire, le titre de l'eau lourde peut se détériorer ; pour des raisons neutroniques, il doit être maintenu à 99,7 %. D'autre part, la production de tritium dans l'eau lourde est importante, environ 4 curies par dm^3 et par an. Pour faciliter les interventions sur les circuits, la teneur en tritium est limitée à 2 Ci/ dm^3 . Une installation a donc été prévue pour éliminer à la fois le tritium et l'hydrogène. Cette installation utilise un procédé original d'échange catalytique entre vapeur d'eau lourde polluée et deutérium gazeux pur. Le deutérium est ensuite liquéfié puis subit une distillation fractionnée qui permet d'éliminer l'hydrogène et le tritium. Une deuxième colonne de distillation concentre le tritium de 0,1% à 99 %, le rendant utilisable pour des applications civiles. L'ensemble de ce procédé avait déjà donné lieu à de petites unités pilotes (Brevet CEA, PV 72612). Notre installation, proche du réacteur, traite 16 l/h d'eau lourde et produit environ 18 g/an de tritium.

Au delà de la cuve piscine de 6 m de diamètre, un mur de béton lourd (densité 5,5) d'un mètre d'épaisseur, complète la protection latérale. Un canal de transfert et de stockage de 7 m de profondeur communique d'un côté avec la piscine du réacteur, et de l'autre avec une cellule chaude.

Une enceinte cylindrique de 60 m de diamètre abrite le réacteur et les équipements principaux (Figure 12). Le bâtiment est divisé fonctionnellement en trois niveaux :

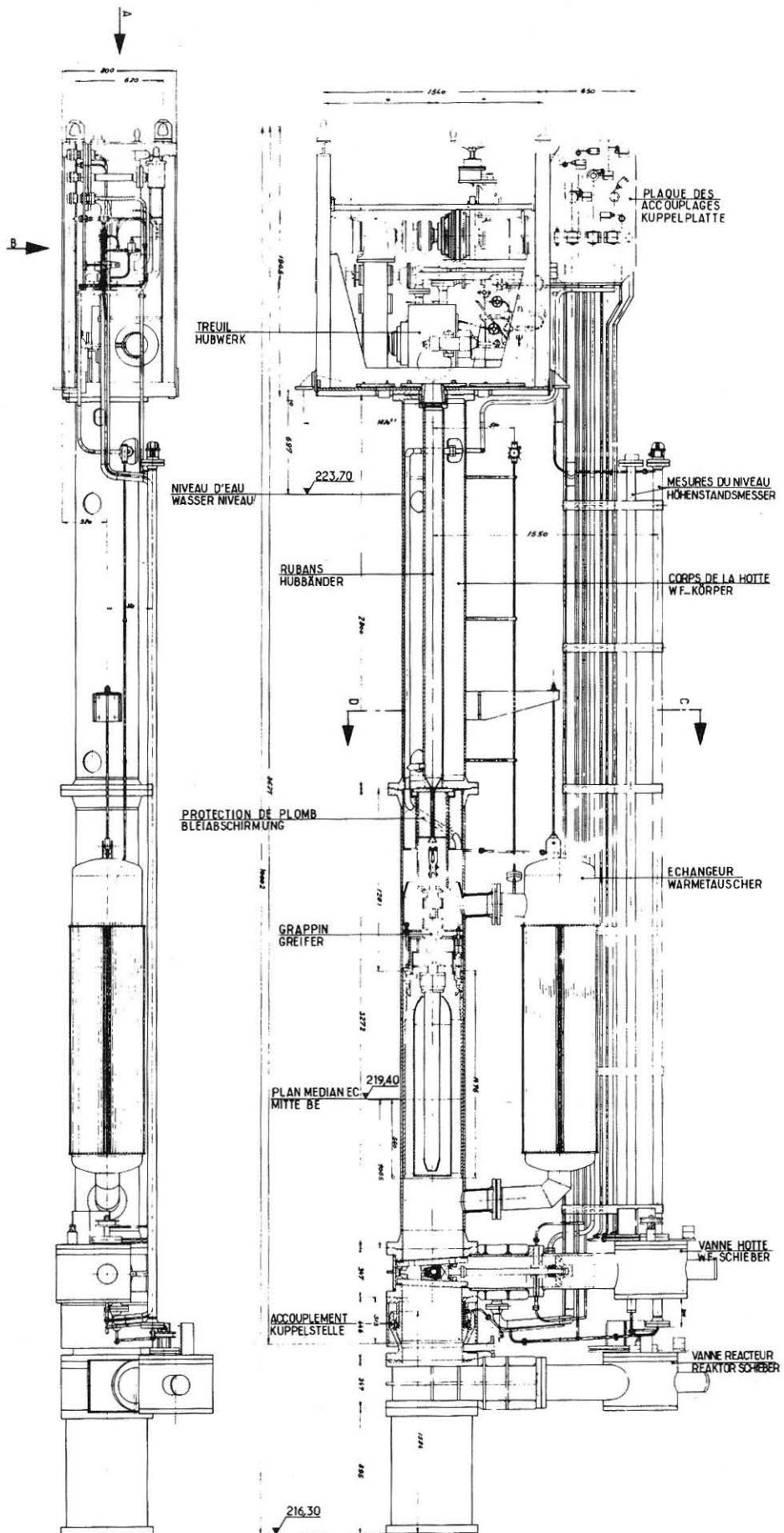


Fig. 11. - La hotte de manutention

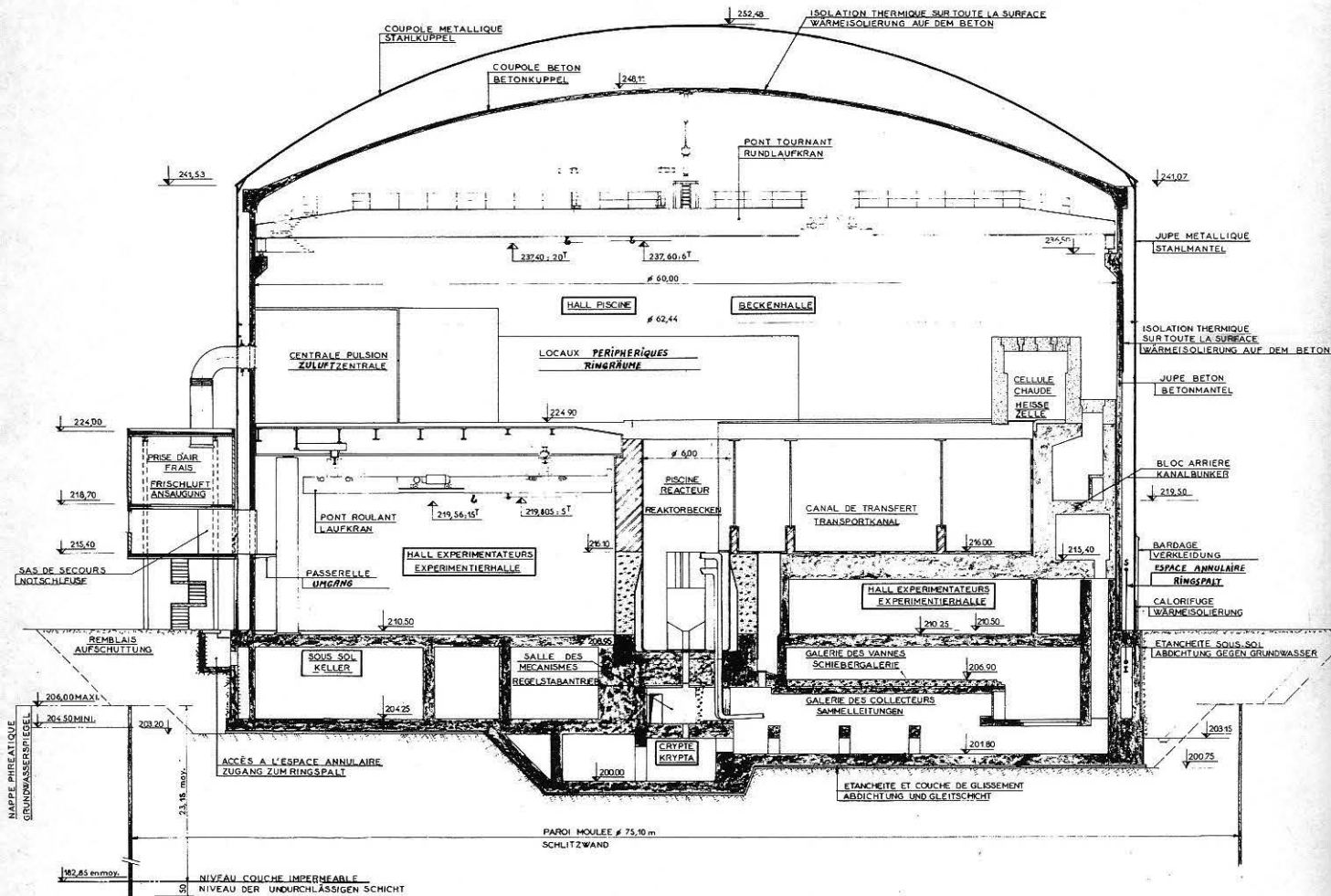


Fig. 12. — Coupe générale du bâtiment réacteur

- un sous-sol, qui contient tous les circuits d'eau et la partie extraction de la ventilation ;
- un plancher, à 1,3 m au dessous du coeur, réservé aux expérimentateurs ;
- un plancher supérieur, au niveau de la piscine, servant essentiellement à l'exploitation du réacteur et des dispositifs verticaux.

Le système de ventilation permet de distinguer ces trois zones où les risques de contamination sont différents.

Le confinement général est assuré par une enceinte parfaitement étanche, rendue nécessaire par les conditions particulières du site. Cette enceinte est constituée d'une paroi intérieure de 40 cm de béton et d'une paroi extérieure indépendante en acier. L'espace intermédiaire est maintenu en permanence à une surpression de 150 mbar, valeur qui excède toute surpression interne accidentelle, y compris celle consécutive à une mise à

l'air de l'élément combustible irradié.

IV. — ORGANISATION ET DEROULEMENT

Les premiers contacts entre physiciens et ingénieurs des deux pays datent du début de 1965. Les études se développèrent progressivement puis furent mises en commun. En janvier 1967, un accord fut signé entre les deux gouvernements. Les textes de l'accord comportent une convention diplomatique, un contrat de société et les statuts de cette société. La convention prévoit :

- la création de l'INSTITUT MAX VON LAUE — PAUL LANGEVIN,
- la construction du Réacteur à Haut Flux dans le cadre d'une coopération bilatérale,

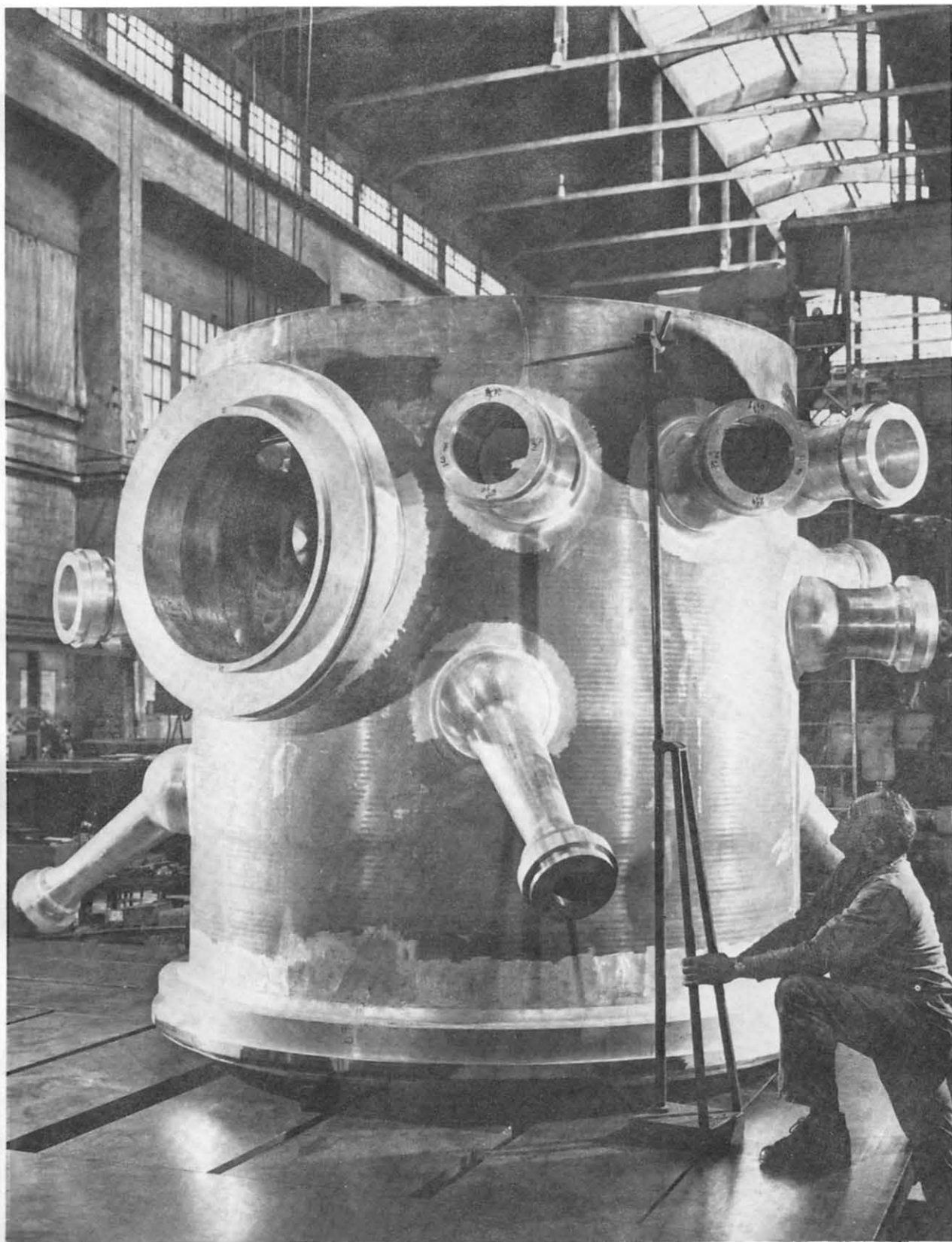


Fig. 13. — Bidon réflecteur : contrôle, tracage et balancement de la partie supérieure avant soudage (31 août 1970). Le bidon est disposé ici la tête en bas.

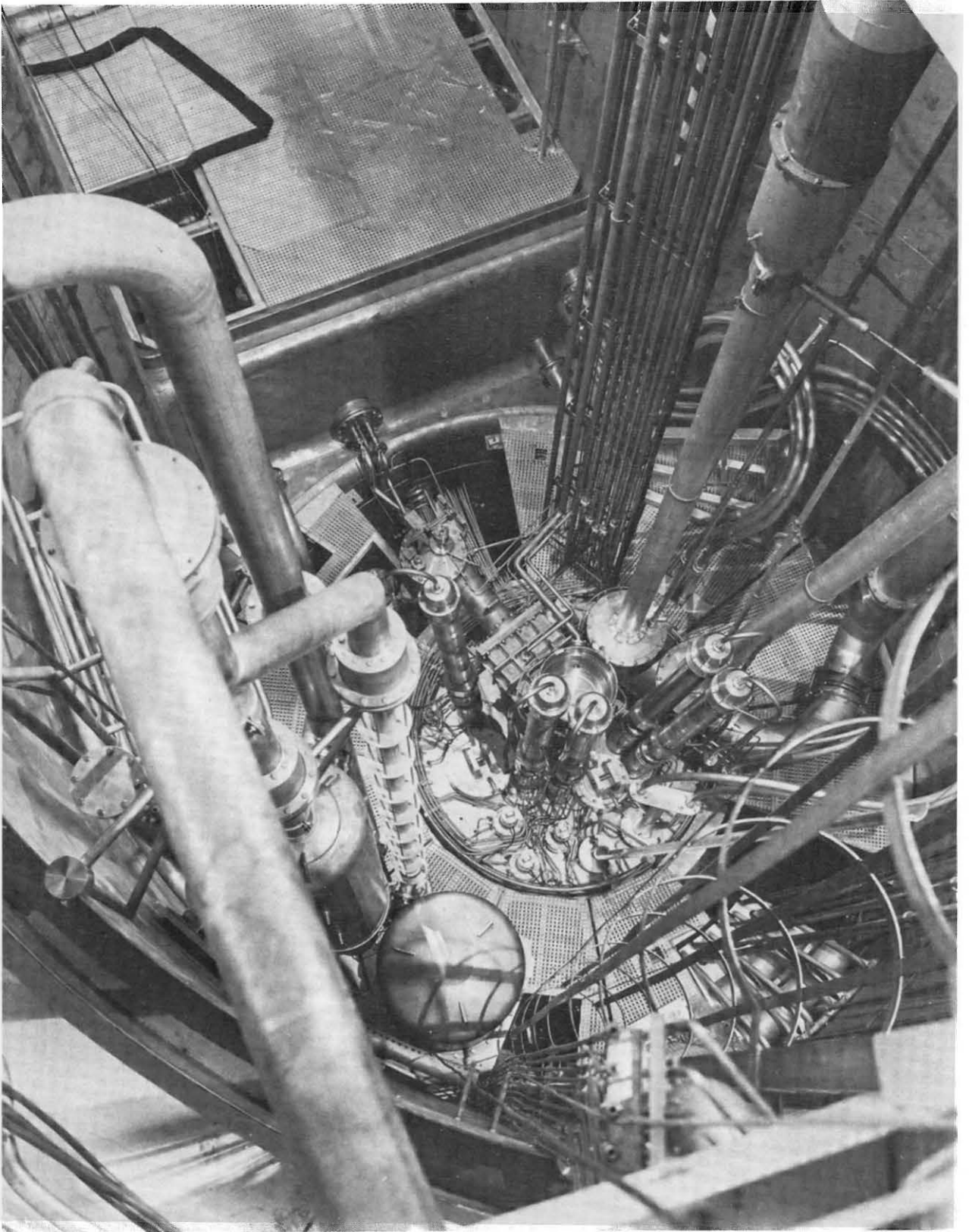


Fig. 14. — Bloc pile et piscine (octobre 1971)

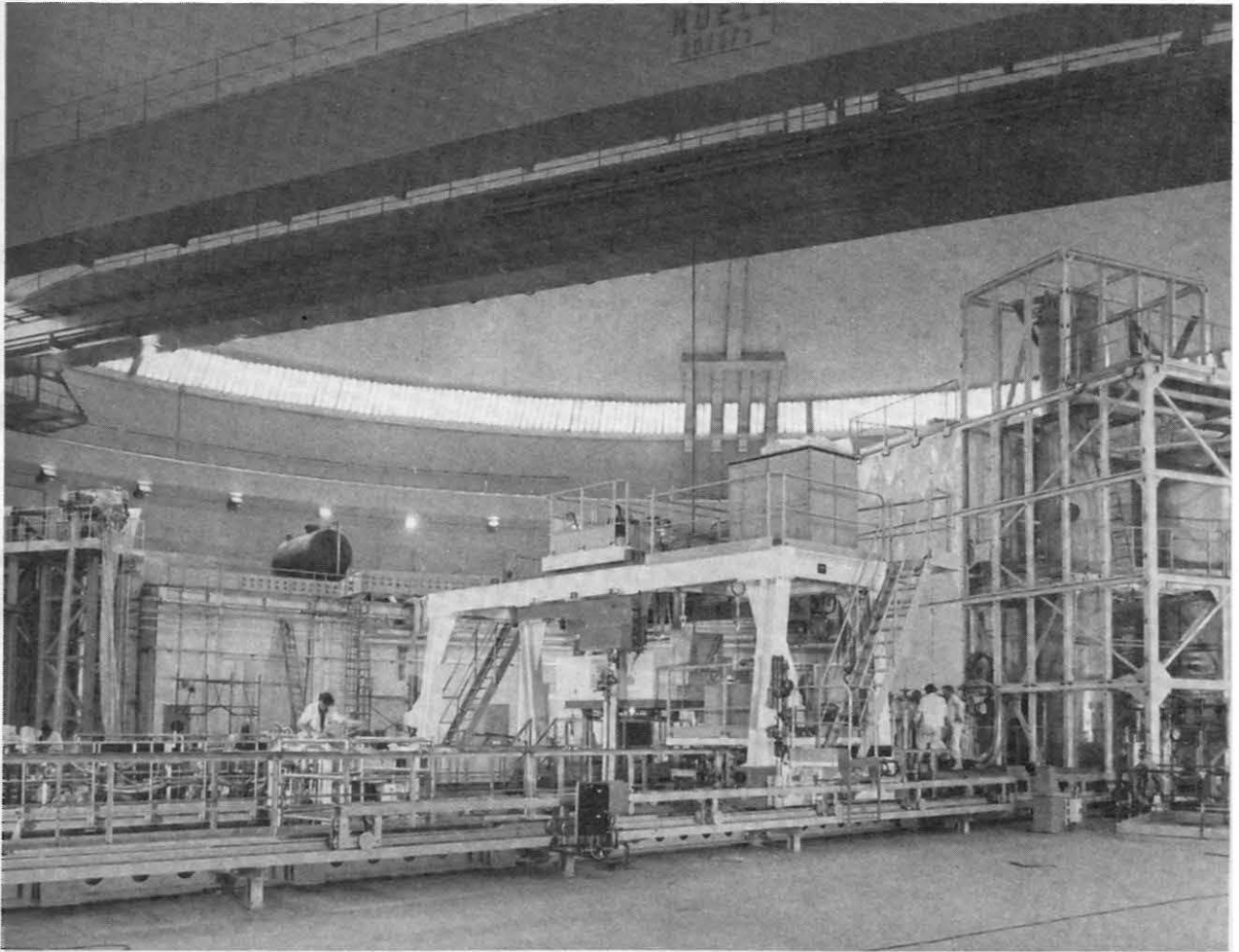


Fig. 15. — Le hall piscine (juin 1971)

— l'exploitation du réacteur avec possibilité d'extension dans le cadre d'une coopération élargie à d'autres organismes ou d'autres pays.

Pour bénéficier du maximum d'indépendance et de souplesse, l'INSTITUT MAX VON LAUE — PAUL LANGEVIN fut créé sous forme d'une société civile de droit français dont les associés sont, du côté allemand, la GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG avec 50 % de participation initiale aux dépenses de construction et d'exploitation, et du côté français, le CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE et le COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE, avec chacun une participation de 25 %. Cette société est administrée par un Comité de Direction dont le Président est alternativement allemand et français, par un Directeur allemand et un Directeur Adjoint français. Le Directeur est assisté par un Conseil Scientifique paritaire. En outre une Commission de Contrôle des Comptes s'assure a posteriori de la régularité des opérations et rend compte au Comité Directeur. Les associés ont confié la responsabilité des études et de la construction à un Chef de Projet français et à un Chef de Projet Adjoint allemand. L'Equipe Projet, composée d'une quarantaine de

personnes, bénéficie de l'aide d'un "Architecte Industriel" franco-allemand pour la coordination et la surveillance de la construction.

Pour respecter le partage paritaire, le Comité Directeur choisit de répartir a priori les études et les fournitures entre les industriels allemand et français, afin d'éviter au maximum les difficultés résultant des différences de langues, de normes et d'habitudes. Cependant quelques contrats importants furent passés avec des groupements binationaux. Cette répartition initiale ne fut pas remise en cause par les ajustements monétaires de 1969 ; seule la réalisation des dispositifs expérimentaux fut répartie paritairement sur les nouvelles bases monétaires.

Née d'un échange d'idées entre Ministres et Scientifiques français et allemands, lors de la troisième Conférence de GENEVE, la réalisation du Réacteur à Haut Flux de GRENOBLE et de l'INSTITUT MAX VON LAUE — PAUL LANGEVIN a été l'occasion d'une collaboration fructueuse entre organismes d'Etat, scientifiques, industriels, des deux pays. Trois ans après le début des travaux sur le site, le réacteur a divergé le

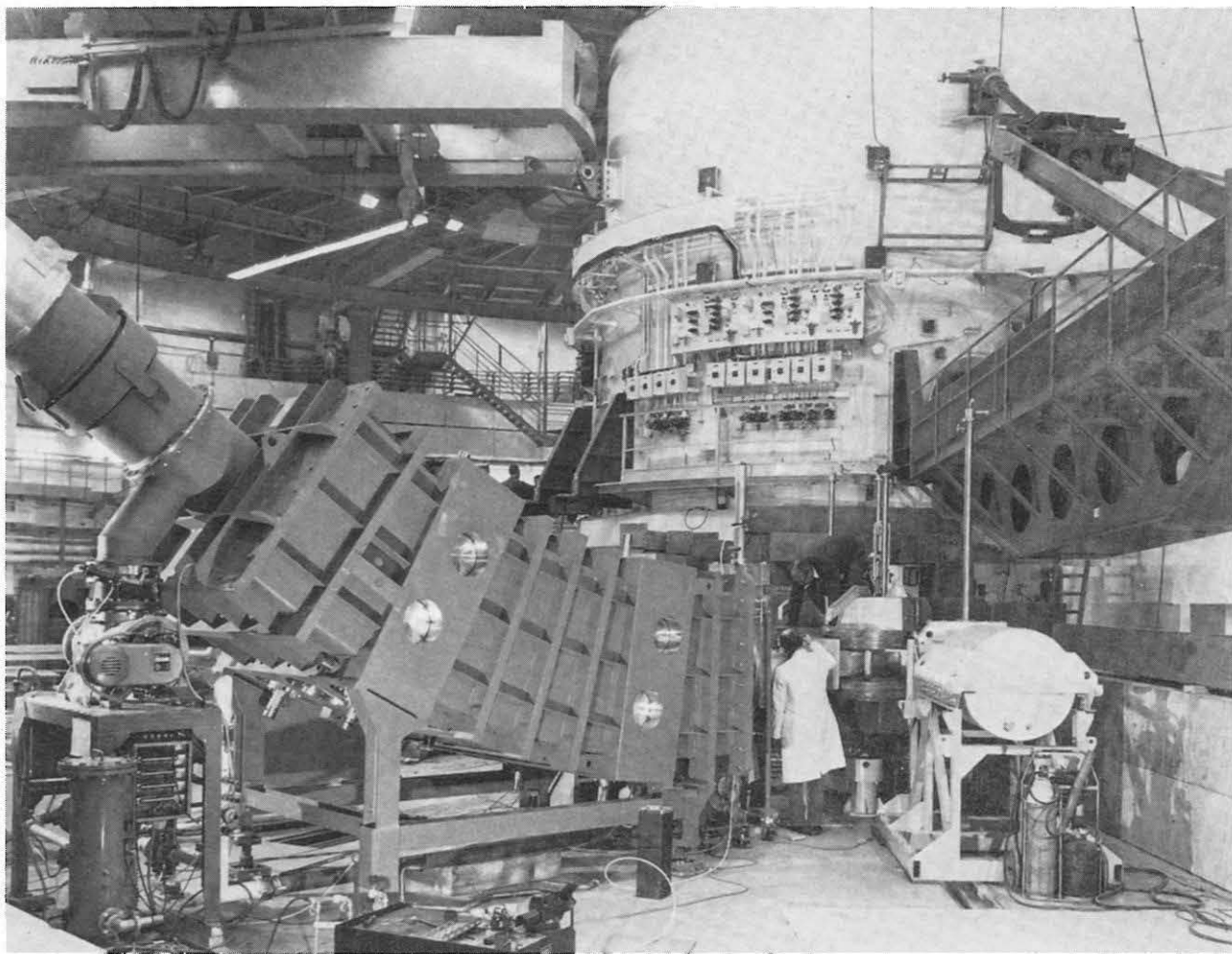


Fig. 16. — Le hall d'expérimentation (octobre 1971)

31 août 1971 et sa montée en puissance s'est effectuée en moins d'une semaine du 16 au 21 décembre de cette même année, alors que déjà plus d'une centaine de chercheurs et de technologues s'apprêtent à mettre en oeuvre la première génération d'expériences.

Il reste à souhaiter que la coopération franco-allemande initiale s'élargisse à d'autres nations ou d'autres organismes. Alors, sans aucun doute, le R. H. F. sera l'instrument d'un progrès scientifique important et prendra sa totale signification sur le plan européen.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BECKURTS, KH and DAUTRAY, R., Project studies for the franco-german High flux reactor (CONF 660925 Santa Fe) New Mexico septembre 19-23 (1966)
- [2] ECKERT, H., and SCHARMER, K., Foehn Das Kritische Experiment für den Deutsch-Französischen Hochflu-reaktor - INSTITUT MAX VON LAUE — PAUL LANGEVIN
- [3] AGERON, P., EWALD, R., HARIG, H.D., VERDIER, J., La source de neutrons froids pour le Réacteur à Haut Flux franco-allemand de GRENOBLE, Energie Nucléaire janvier-février (1971)
- [4] WUNDERLICH, F., BOHME, G., DREXEL, W., Die Heisse Quelle des H F R, Reaktortagung Berlin 20-22 April (1970)
- [5] CHATOUX, J., BRÉGEON, L., REUTLER, H., Industrie Atomique N° 4 sept. oct. 1971
- [6] NETTER, F., Le neutron (Encyclopédie Universalis).